

ПЛАСТОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СХЕМ ПЛАСТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Режим фильтрации во времени

Пространственная структура потока

Распределение гидрогеодинамических параметров

Граничные условия потока

ИСТОЧНИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПЛАСТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Без понижения в смежных горизонтах

С понижением в смежных горизонтах

РАСЧЁТЫ ВОДОЗАБОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ПЛАСТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ РАЗВЕДКИ

ФОРМИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ВОДЫ НА ПЛАСТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

«Естественное» изменение качества воды при
эксплуатации

Проектирование ЗСО

ИЗОЛИРОВАННЫЕ ПЛАСТЫ

ПЛАСТОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Эти месторождения наиболее наглядно можно охарактеризовать на примере водоносных систем крупных артезианских бассейнов платформенного типа, хотя пластовое строение свойственно разрезам самого разнообразного возраста и генезиса.

В артезианских бассейнах используются преимущественно *межпластовые водоносные горизонты*; грунтовый водоносный горизонт часто подвержен существенному загрязнению, а его малая мощность и невысокие фильтрационные свойства водовмещающих отложений затрудняют создание сколько-нибудь крупных централизованных водозаборов.

Месторождения подземных вод в артезианских бассейнах локализируются в пределах мощности *зоны пресных вод* (зоны интенсивного водообмена) – обычно до глубин 100-400 м, редко более.

Основные характеристические особенности гидрогеологических условий формирования эксплуатационных запасов в артезианских бассейнах:

- выраженное *пластовое строение* водоносной системы, то есть чередование в разрезе проницаемых (водоносных) и слабопроницаемых (разделяющих) пластов,
- *региональное распространение* пластов, относительная устойчивость их мощности и литолого-фациальных характеристик (в основном, морские условия седиментации),
- определяющая роль процессов *перетекания* как в естественных условиях (вспоминаем схему Мятиева-Гириного – формирование подземного стока в пластовых разрезах), так и (тем более!) при эксплуатации водозаборов за счёт искусственно создаваемых вертикальных градиентов напора между водоносными пластами.

Однако, роль процессов перетекания существенно различна в пределах артезианской структуры – как в плане, так и по глубине. В соответствии с современными представлениями о гидрогеодинамической зональности артезианских структур в региональном плане выделяются:

- краевая зона, для которой характерно а) неглубокое залегание продуктивных водоносных горизонтов; б) относительно высокая проницаемость разделяющих слоёв из-за слабой консолидированности, опесчаненности (мелководные, прибрежные условия седиментации) и воздействия современных и древних экзогенных процессов при небольших глубинах залегания; в) достаточно тесная связь с гидрометеорологическими факторами;



– внутренняя зона, характеризующаяся уже относительно глубоким погружением водоносных горизонтов; ей свойственны а) значительная мощность, высокая степень консолидации и снижение фильтрационных свойств водоносных и слабопроницаемых слоев; б) постепенное затруднение водообмена; в) обострение проблем с химическим составом подземных вод.

ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СХЕМ ПЛАСТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

1. РЕЖИМ ФИЛЬТРАЦИИ ВО ВРЕМЕНИ – в общем случае, *нестационарный*, так как перетекание между слоями проявляется и развивается достаточно долго. Принципиально возможно существование (в течение реального расчётного срока эксплуатации) самых разнообразных случаев: от существенного *нестационарного* до длительного *ложностационарного* или *истинно стационарного* режима.

2. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ПОТОКА также зависит от степени проявления перетекания. Во «внутренней» зоне взаимодействие горизонтов практически малозначимо, поэтому допустимо применение *плановой* или даже *одномерной* (радиальной) расчётной структуры течения к водозабору по основному водоносному горизонту. В «краевой» зоне нужно учитывать перетоки из смежных горизонтов, поэтому в общем случае здесь следует применять *трёхмерную* структуру, но при выполнении предпосылок перетекания ($K_0 m_0 < 0.01 K m$) возможно использование *плоско-пространственной* структуры течения: двумерные, плоские в плане, потоки в водоносных горизонтах и одномерное, линейное течение в разделяющих слоях (по нормали к напластованию). Использование плоско-пространственной расчётной структуры существенно облегчает ситуацию: становятся возможными аналитические расчёты, да и моделирование заметно проще, чем для «истинно» трёхмерных моделей.

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ. Какие параметры необходимы для расчётов? Проводимость и водоотдача всех взаимодействующих горизонтов (параметры разделяющих слоев, пожалуй, формально правильнее относить к описанию граничных условий).

В силу литолого-фациальной устойчивости осадочных платформенных толщ часто можно применять схемы однородных (квазиоднородных) пластов. Однако, области депрессии от водозаборов обычно очень большие (невысокая упругая водоотдача, соответственно – высокая пьезопроводность и большие радиусы влияния), поэтому всё же

следует быть готовым к проявлению более или менее значительной неоднородности в плане по всем параметрам.

4. ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ – в плане водоносную систему чаще всего можно считать (временно) *неограниченной* (хотя в частных случаях это вовсе не факт). Основное значение имеют граничные условия в разрезе, определяющие интенсивность *перетекания* – взаимодействия основного горизонта с выше- и нижезалегающими смежными пластами через слабопроницаемые разделяющие слои.

Наиболее активное взаимодействие характерно для «краевой» зоны артезианских бассейнов.

Перетекание – медленно проявляющийся и физически плохо изученный процесс, так как активная пористость глин практически ничтожна. Тем не менее (точнее, за неимением лучшего) в гидрогеодинамических построениях принимается, что перетекание подчиняется линейному закону фильтрации.

ИСТОЧНИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЗ ПЛАСТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

При кажущейся ясности это непростой вопрос, решение которого требует проследить балансовую цепочку до конца, чтобы выявить весь набор процессов и параметров, контролирующих балансово-гидрогеодинамическую схему.

Сначала примем, что **В СМЕЖНЫХ ГОРИЗОНТАХ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НЕ ПРОИСХОДИТ Понижение уровней** (пока без обсуждения – в каких условиях и почему это возможно?).

Рассматриваем единичный в плане элемент пластовой водоносной системы при стационарном режиме фильтрации; ограничимся рассмотрением взаимодействия только через один разделяющий слой (в кровле основного горизонта) – принципиально всё будет так же и в случае «двойного» взаимодействия. Будем обозначать индексами: **1** – основной горизонт, **2** – смежный горизонт, **0** – разделяющий слой.

А. Случай расположения водозабора в области первоначального питания, то есть в естественных условиях, до начала эксплуатации, основной горизонт получал *питание* из вышележающего смежного горизонта (в схеме Мятиева-Гириногого это происходит на междуречных пространствах).

Естественное соотношение уровней $H_2^e > H_1^e$ (рис.8.1).

Расход естественного перетекания в балансовом смысле положителен ($q_T^e > 0$); при формировании депрессионной воронки направление перетекания не меняется (то есть



$q_{\Gamma}^{\text{э}} > 0$), но интенсивность его возрастает. Разность величин трансграничного расхода в ненарушенных условиях и при эксплуатации (дельта-баланс) в данном случае является единственным (при стационарном режиме депрессии) балансовым источником формирования ЭЗ ($q_{\text{э}}$); по генетической принадлежности – это **ПРИВЛЕКАЕМЫЕ РЕСУРСЫ** (возрастание естественного питания $\Delta Q_{\text{п}}$).

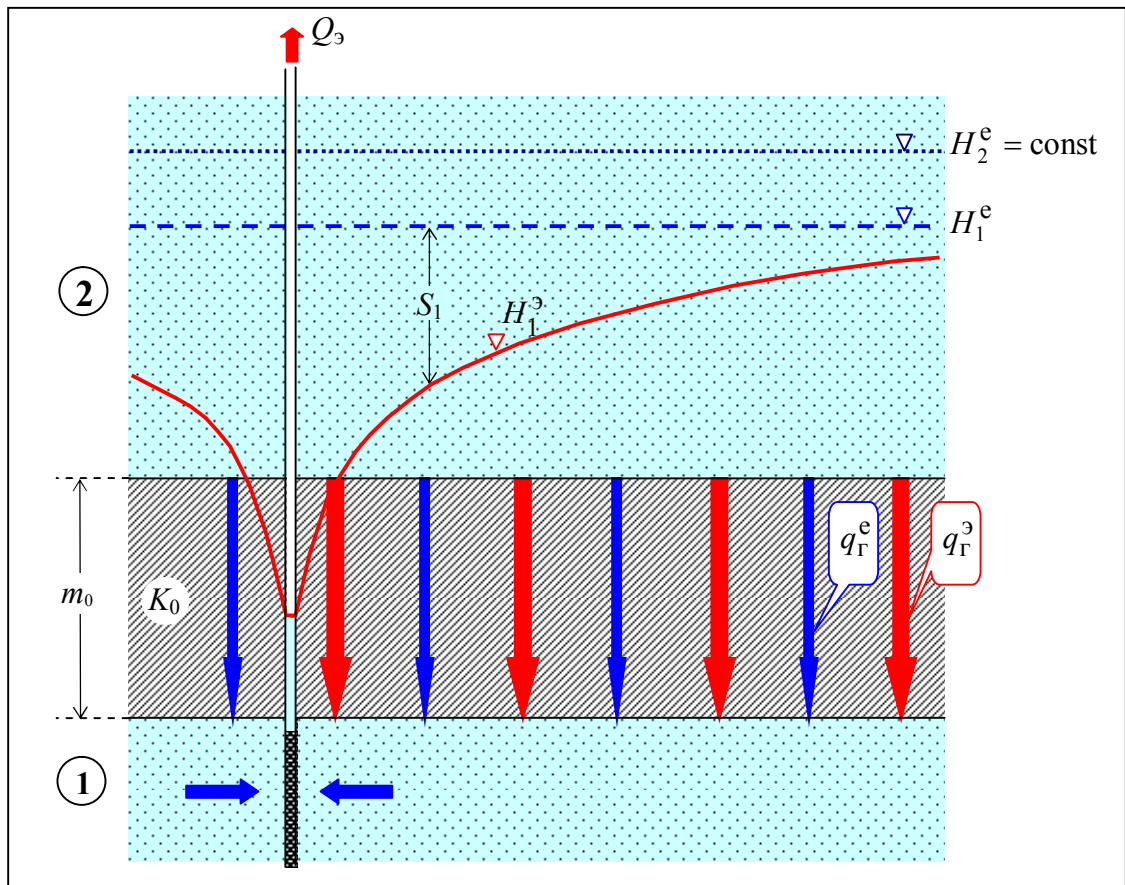


Рис.8.1. Взаимодействие водоносных горизонтов в **ЕСТЕСТВЕННЫХ** условиях и при **ЭКСПЛУАТАЦИИ** водозабора в области первоначального питания при постоянном уровне в смежном горизонте

Гидрогеодинамическое обоснование формирования величины $q_{\text{э}}$: напомним – для соблюдения балансового знака расхода на первое место в трансграничной разности напоров нужно ставить напор на границе – в данном случае напор в смежном горизонте ($H_2^e = \text{const}$):

$$q_{\text{э}} = \Delta q_{\Gamma} = q_{\Gamma}^{\text{э}} - q_{\Gamma}^e = K_0 \frac{H_2^e - H_1^{\text{э}}}{m_0} - K_0 \frac{H_2^e - H_1^e}{m_0} = K_0 \frac{H_1^e - H_1^{\text{э}}}{m_0} = K_0 \frac{S_1}{m_0} = \frac{S_1}{f_0} = \chi_0 S_1.$$

Это граничное условие 3 рода.

$f_0 = \frac{m_0}{K_0}$ – удельное вертикальное фильтрационное сопротивление разделяющего слоя,

$\chi_0 = \frac{1}{f_0}$ – коэффициент перетекания (формально – коэффициент пропорциональности

между притоком через границу и напором (понижением) в пласте).

Б. Что изменится, если водозабор расположить в области первоначальной разгрузки из основного горизонта в смежный (это более частый случай – долины рек, по схеме Мятиева-Гириного) ?

Естественное соотношение уровней $H_1^e > H_2^e$; балансовый знак расхода естественного перетекания – отрицательный ($q_r^e < 0$).

При эксплуатации в области стационарной депрессионной воронки образуются две концентрические зоны (рис.8.2):

В зоне I (внутренняя часть воронки) $H_1^z < H_2^e$; направление перетекания (следовательно, и балансовый знак расхода) изменяется на противоположное ($q_r^z > 0$).

В зоне II (периферия воронки) $H_1^z > H_2^e$; сохраняется направление и балансовый знак перетекания ($q_r^z < 0$), но расход его становится меньше естественного.

Несложно убедиться в том, что гидрогеодинамическое описание формирования величины q_z как разности расходов перетекания ($q_r^z - q_r^e$) не только будет одинаковым в обеих зонах, но и аналогично вышерассмотренному случаю **A** – это граничное условие 3 рода. Однако, балансовая структура ЭЗ видоизменяется. На периферии воронки (зона II), где понижения невелики, происходит лишь частичная инверсия естественной разгрузки в смежный горизонт (это ΔQ_p , то есть **ЕСТЕСТВЕННЫЕ РЕСУРСЫ** основного горизонта). Вблизи водозабора (зона I) происходит полная инверсия естественной разгрузки, после чего возникает перетекание из смежного горизонта, то есть **ПРИВЛЕКАЕМЫЕ РЕСУРСЫ** (дополнительное питание основного горизонта ΔQ_{II}).

Таким образом, видно, что независимо от знака (направления) начального взаимодействия и от соотношения уровней при эксплуатации по всей депрессионной воронке существует **ГРАНИЧНОЕ УСЛОВИЕ 3 РОДА** (на кровле и/или подошве основного пласта), генетически связанное с явлением перетекания через слабопроницаемые

глинистые породы. Три рассмотренных варианта (А, Б-I, Б-II) различаются только соотношением знаков естественных (q_{Γ}^e) и нарушенных (q_{Γ}^3) трансграничных расходов; при этом в любом случае $\Delta q_{\Gamma} > 0$.

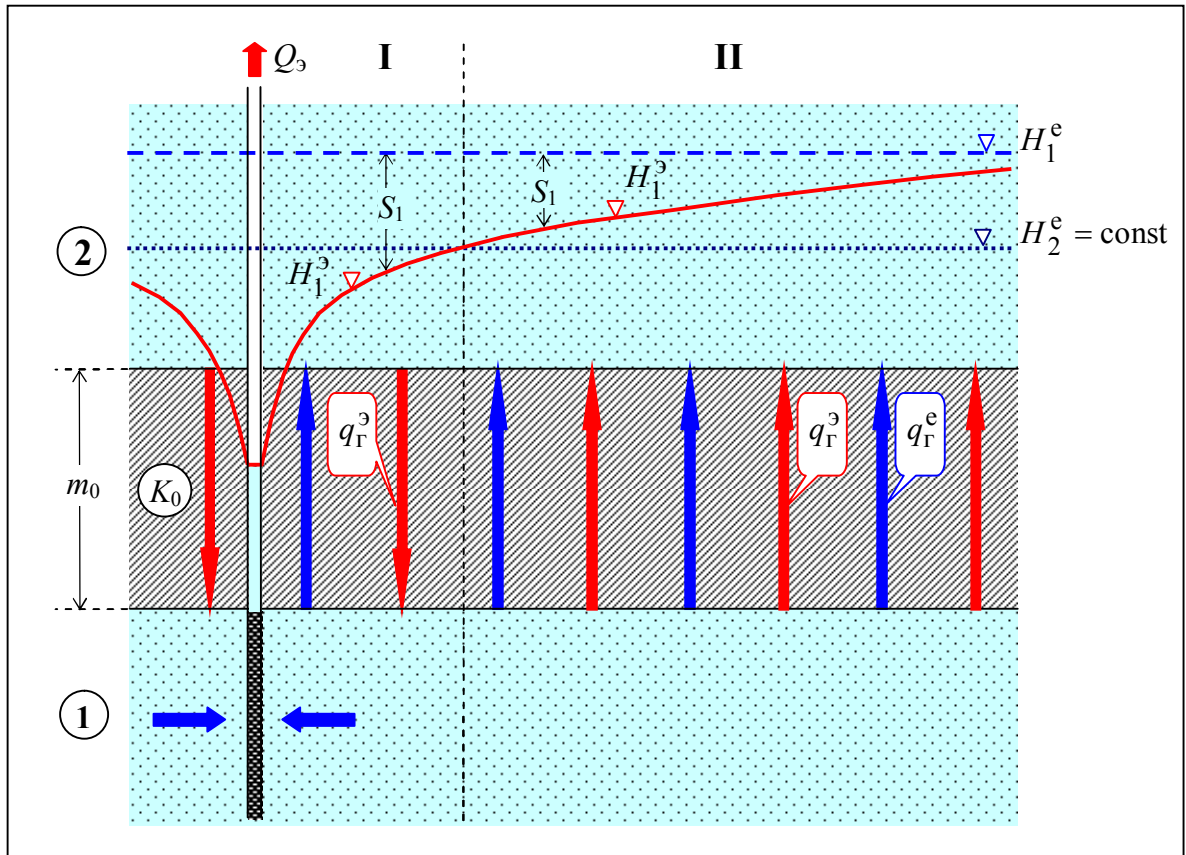


Рис.8.2. Взаимодействие водоносных горизонтов в **ЕСТЕСТВЕННЫХ** условиях и при **ЭКСПЛУАТАЦИИ** водозабора в области первоначальной разгрузки при постоянном уровне в смежном горизонте

Важный практический вопрос – когда наступит стационар (то есть какой режим является расчётным для прогноза работы водозабора) ?

Теоретически нестационарный режим сохраняется бесконечно долго; доля срабатываемых упругих запасов основного горизонта стремится к нулю лишь при $t \rightarrow \infty$:

$$\bar{Q}_{\text{упр}} = \frac{Q_{\text{упр}}}{Q_3} = \exp\left(-\frac{a^* t}{B^2}\right),$$

где a^* – пьезопроводность основного горизонта, B – фактор перетекания.

Отсюда:

$$t = - \left(\frac{B^2}{a^*} \right) \ln \bar{Q}_{\text{упр}} .$$

Принимая, что стабилизацию можно считать состоявшейся, если величина $\bar{Q}_{\text{упр}}$ снизилась до значений 0.1-0.01, получим критерий времени стабилизации:

$$t_{\text{ст}} \approx (2.3 - 4.6) \frac{B^2}{a^*} .$$

Теперь следует обосновать возможность использования условия постоянства уровня в смежном горизонте $H_2^e = \text{const}$. Такое допущение предполагает, что в смежном горизонте запасы воды теоретически мгновенно и полностью восстанавливаются или расходуются очень незначительно (медленно). Естественно, что в таких условиях следует рано или поздно ожидать наступления стационарного балансово-гидрогеодинамического состояния.

Выполнение условия «мгновенного и полного» восстановления запасов воды практически возможно при наличии достаточно мощных собственных граничных условий в смежном горизонте (например, разветвлённая площадная система рек, озёр, болот, очагов эвапотранспирации). Кроме того, при высокой (гравитационной!) водоотдаче смежного горизонта понижения в нём хотя и будут развиваться, но гораздо медленнее, чем в основном горизонте.

Отсюда следует, что допущение относительного постоянства напоров в смежном горизонте реально только в том случае, если он имеет *грунтовый* характер.

Если же смежный горизонт неспособен быстро и эффективно восстанавливать свои запасы, то в нём будет постепенно **РАЗВИВАТЬСЯ Понижение уровня** в связи с расходом воды на дополнительно возникшее перетекание. Можно полагать, что эта ситуация более реальна в природных условиях.

Рассмотрим её отличия от схемы с постоянным уровнем H_2^e (на примере области первоначального питания основного горизонта).

В связи с образованием депрессионной воронки в смежном горизонте (рис.8.3) несколько видоизменится гидрогеодинамическое описание формирования величины q_3 :



$$q_3 = \Delta q_{\Gamma} = q_{\Gamma}^{\text{э}} - q_{\Gamma}^{\text{е}} = \frac{H_2^{\text{э}} - H_1^{\text{э}}}{f_0} - \frac{H_2^{\text{е}} - H_1^{\text{е}}}{f_0} = \frac{(H_1^{\text{е}} - H_1^{\text{э}}) - (H_2^{\text{е}} - H_2^{\text{э}})}{f_0} = \frac{S_1 - S_2}{f_0} = \chi_0(S_1 - S_2).$$

Видно, что это тоже условие 3 рода, но интенсивность его действия при прочих равных условиях слабее – за счёт наличия величины S_2 .

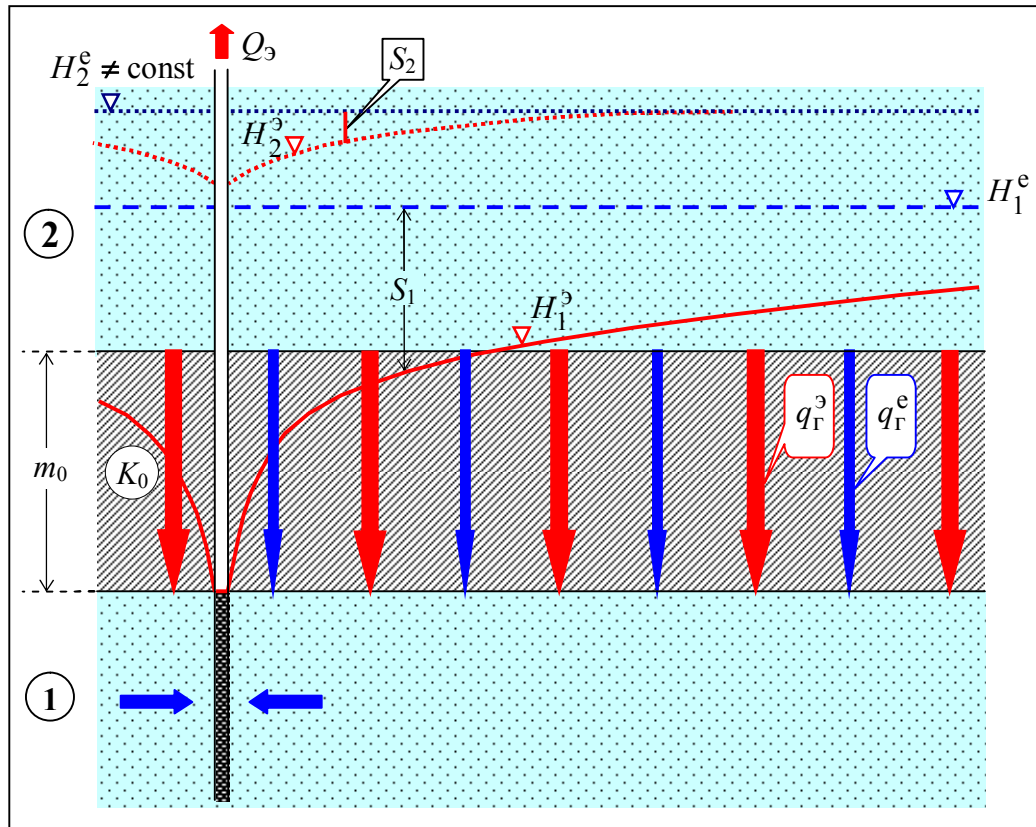


Рис.8.3. Взаимодействие водоносных горизонтов в **ЕСТЕСТВЕННЫХ** условиях и при **ЭКСПЛУАТАЦИИ** водозабора в области первоначального питания при снижающемся уровне в смежном горизонте

Надо чётко понимать, что в этой ситуации (при отсутствии других граничных условий) не может быть достигнут стационарный режим фильтрации, поэтому приведенное на рис.8.3 состояние депрессионных поверхностей надо относить лишь к некоторому конкретному моменту времени от начала эксплуатации.

Отметим некоторые интересные детали формирования депрессии в подобных условиях:

1. Как выглядит развитие понижений в обоих горизонтах во времени? На рис. 8.4 показана последовательная смена характерных этапов временного прослеживания понижений, завершающаяся установлением квазистационарного режима с единым темпом снижения уровней в обоих взаимодействующих пластах.

2. При наступлении квазистационарного режима разность понижений уровней становится постоянной $S_1 - S_2 = \text{const}$, следовательно, фиксируются и величины перетекания через разделяющий слой $q_T^3 = \text{const}$, то есть в принципе в зоне квазистационара происходит *конверсия* граничного условия 3 рода (вырождение в граничное условие 2 рода) и расход перетекания в этой зоне уже не зависит от положения напоров и величин понижений.

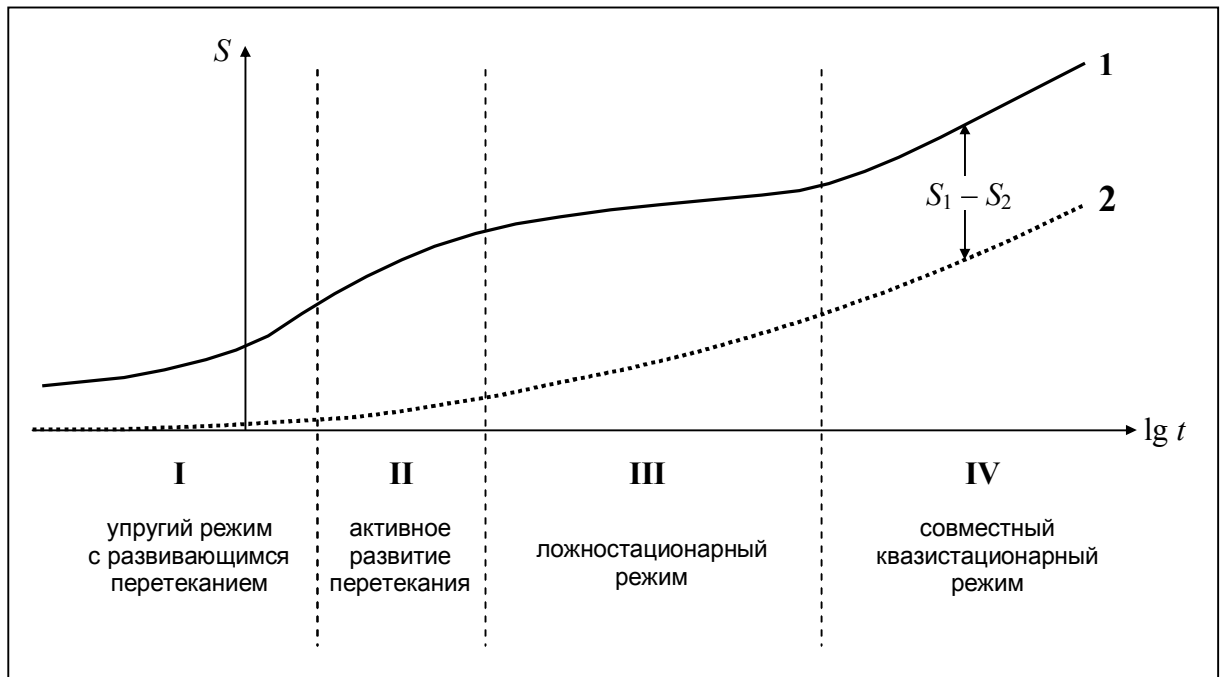


Рис.8.4. Временное прослеживание понижений во взаимодействующих водоносных горизонтах

3. Рассмотрим доленое участие упругих запасов основного межпластового горизонта $\bar{Q}_{\text{упр},1} = \frac{Q_{\text{упр},1}}{Q_3}$ в обеспечении дебита водозабора. Оно может существенно различаться в зависимости от характера смежного горизонта.

Теоретическое решение:

$$\bar{Q}_{\text{упр},1} = \frac{b_2}{Z} + \frac{b_1}{Z^2 t} (1 - \exp(-t Z));$$

$$b_1 = \frac{\chi_0}{\mu_1^*}; \quad b_2 = \frac{\chi_0}{\mu_2}; \quad Z = b_1 + b_2 = \chi_0 \frac{\mu_1^* + \mu_2}{\mu_1 \mu_2}$$

(индексация сохраняется: 1 – основной горизонт с упругой водоотдачей μ_1^* , 2 – смежный горизонт с водоотдачей μ_2 , характер которой может быть разным).

При $t \rightarrow \infty$ предел доли упругих запасов составляет $\bar{Q}_{\text{упр},1} \rightarrow \frac{b_2}{Z} \rightarrow \frac{\mu_1^*}{\mu_1^* + \mu_2}$.

Возможные предельные варианты:

а) если смежный горизонт – межпластовый и водоотдача μ_2 имеет *упругий* характер, то μ_1^* и μ_2 близки по величине. Соответственно $\bar{Q}_{\text{упр},1} \rightarrow 0.5$, то есть оба горизонта примерно поровну участвуют в обеспечении Q_3 . Ложностационарный этап короткий и выражен слабо.

б) если смежный горизонт – грунтовый и имеет *гравитационную* водоотдачу, то $\mu_2 \gg \mu_1^*$. Следовательно, $\bar{Q}_{\text{упр},1} \rightarrow \frac{\mu_1^*}{\mu_2} \approx 0.01$ и менее, то есть доля упругих запасов самого эксплуатируемого горизонта ничтожна мала и Q_3 практически полностью обеспечивается перетеканием из грунтового горизонта. Ложный стационар очень рельефный и долгий.

4. Немаловажный практический вопрос: длительность ложностационарного этапа – когда наступит квазистационар?

Теоретическое решение (с некоторыми упрощениями):

$$t_{\text{КВ}} \approx \frac{5 |a_2 - a_1^*| B^2}{a_1^* a_2}, \quad B^2 = T_1 f_0,$$

а) если смежный горизонт межпластовый с *упругой* водоотдачей ($a_1^* \approx a_2$), то $t_{\text{КВ}} \rightarrow 0$ – ложный стационар кратковременный, слабо выраженный;

б) если смежный горизонт грунтовый с *гравитационной* водоотдачей ($a_2 \ll a_1^*$), то $t_{\text{КВ}} \rightarrow \frac{5B^2}{a_2}$.

Численный пример с ординарным набором параметров пластовой системы:

$T_1 = 500 \text{ м}^2/\text{сутки}$, $T_2 = 100 \text{ м}^2/\text{сутки}$, $\mu_2 = 0.1$, $\mu_1^* = 10^{-4}$, $m_0 = 10 \text{ м}$, $K_0 = 10^{-3} \text{ м/сутки}$.

Соответственно $a_1^* = 5 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{сутки}$, $a_2 = 10^3 \text{ м}^2/\text{сутки}$, $B^2 = 5 \cdot 10^6 \text{ м}^2$.

Время $t_{\text{КВ}}$ составит около $2.5 \cdot 10^4$ суток, то есть в течение всего расчётного срока работы водозабора будет проходить ложностационарный режим с чрезвычайно



медленным развитием понижения в основном горизонте, что позволяет в качестве расчётного рассматривать стационарный режим. Однако, как видно на рис.8.4, в течение этого периода будут развиваться достаточно заметные понижения в смежном горизонте.

РАСЧЁТЫ ВОДОЗАБОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ПЛАСТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

Рациональные схемы водозаборных сооружений – компактные, то есть одиночные скважины, площадные группы скважин, кольцевые батареи.

Если есть основания принять на прогноз *неизменность* (или незначительное снижение) уровней в смежных горизонтах, то применяют аналитические расчёты по «нестационарной» формуле Хантуша:

$$S = \frac{Q}{4\pi T} W(u, \bar{r}), \quad u = \frac{r_{\text{ВЗ}}^2}{4at}, \quad \bar{r} = \frac{r_{\text{ВЗ}}}{B}.$$

Здесь, как обычно, $r_{\text{ВЗ}}$ имеет смысл либо собственного (расчётного) радиуса одиночной водозаборной скважины, либо радиуса «большого колодца», либо расстояния между взаимодействующими скважинами.

Если время ожидаемой стабилизации режима понижений мало по сравнению с реальным сроком эксплуатации, то можно пользоваться предельными формами зависимости Хантуша:

$$S = \frac{Q}{2\pi T} K_0(\bar{r}) \text{ – для расчёта понижений в любой точке области (включая водозабор),}$$

или $S = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{1.12}{\bar{r}}$ – для расчёта понижений в водозаборе и в ближайшей к нему области (при $\bar{r} < 0.3$).

(K_0 – символ функции Бесселя второго рода от мнимого аргумента нулевого порядка – не путать с обозначением коэффициента фильтрации разделяющего слоя K_0).

Фактор перетекания B в общем случае является интегральной характеристикой перетекания через разделяющие слои в кровле и подошве основного пласта и рассчитывается по принципу «параллельного соединения» удельных фильтрационных сопротивлений этих слоёв :

$$B = \frac{B_1 B_2}{B_1 + B_2} = \sqrt{\frac{T_1 f_0 f_{00}}{(f_0 + f_{00})}} = \sqrt{\frac{T_1 m_0 m_{00}}{(K_0 m_{00} + K_{00} m_0)}},$$

где индексы «0» и «00» придаётся разделяющим слоям в кровле и подошве пласта соответственно.



Вполне вероятные частные случаи:

$$a) f_{00} \approx f_0 \rightarrow B \approx \sqrt{0.5T_1 f_0},$$

$$б) f_{00} \gg f_0 \rightarrow B \approx \sqrt{T_1 f_0}.$$

Если на прогноз ожидается длительное *совместное снижение* уровней во взаимодействующих горизонтах, а также в случае сложной неоднородности водоносных горизонтов и разделяющих слоёв нужно использовать моделирование. Пространственная структура потока на модели может быть реализована либо в *плоско-пространственной* постановке, основанной на предпосылках перетекания, либо в полной *трёхмерной* (с упругим режимом фильтрации в разделяющих слоях).

В наиболее сложных ситуациях, когда оценка всего комплекса гидрогеодинамических параметров пластовой системы малодостоверна, следует применять *гидравлические* приёмы оценки ЭЗ.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ РАЗВЕДКИ

В силу пространственного характера эксплуатационной депрессии напоров система расчётных гидрогеодинамических параметров должна охватывать все взаимодействующие элементы водоносной толщи:

– для основного горизонта: проводимость T , пьезопроводность a (для аналитических расчётов) и упругая водоотдача μ^* (для моделирования); ёмкостные параметры необходимы и важны, так как возможен длительный нестационар.

– для смежных горизонтов: в общем случае – проводимость, пьезо(уровне)проводность и водоотдача, потому что в ходе разведки далеко не всегда можно уверенно заключить, какую схему придётся принимать для прогноза (с постоянным или понижающимся уровнем в смежных горизонтах).

– для разделяющих слоёв: коэффициенты фильтрации K_0 , K_{00} или коэффициенты перетока χ_0 , χ_{00} (для аналитических расчётов – факторы перетекания B_0 , B_{00} , B). В некоторых случаях (мощные разделяющие слои) нужно обращать внимание и на упругую ёмкость разделяющих слоёв μ_0^* , которая для региональных воронок может иметь вполне реальное значение как дополнительный источник использования упругих естественных запасов.



Очевидно, что для достоверной оценки столь сложной параметрической совокупности необходим тщательно продуманный и не менее тщательно исполненный комплекс полевых опытных работ.

ОПЫТНЫЕ ОТКАЧКИ

Длительность откачек должна быть достаточной для *чёткого проявления перетекания*; очень желательно достоверно зафиксировать наступление устойчивой ложной или истинной *стабилизации* (причём с контролем развития понижений по графикам прослеживания в координате lgt , а не по субъективной оценке темпа снижения уровней, который при больших временах может быть обманчиво низким).

Наблюдения при откачках должны иметь *пространственный* характер, то есть не только в плане в опробуемом водоносном горизонте, но и по вертикали во всей взаимодействующей толще. Важно оборудовать *ярусные пьезометры* в смежных горизонтах и в разделяющих слоях – они должны ответить на кардинальный вопрос: снижаются или нет уровни в смежных горизонтах? Проблема состоит в том, что отсутствие реакции в смежных горизонтах может объясняться прямо противоположными причинами: либо *отсутствием значимого перетекания* (малые $K_{0(00)}$, $\chi_{0(00)}$), либо при «нормальном» перетекании – *наличием мощных сдерживающих балансовых факторов* в смежном горизонте или просто малой длительностью откачки. При решении этого вопроса нужно учитывать все наблюдаемые обстоятельства:

– наличие тенденции к выполаживанию или даже стабилизации уровней в опробуемом горизонте;

– поведение уровня в смежном горизонте определяется не только (а, может быть, и не столько) реакцией на перетекание, но и *собственными режимобразующими факторами!* Нужны независимые наблюдения за естественным режимом вне зоны откачки, так как откачки обычно довольно длительные (месяц, а нередко и более);

– обязательным признаком, подтверждающим существование перетекания, является адекватная *реакция пьезометров в соответствующих разделяющих слоях*. Важно понимать, что пьезометры, устанавливаемые в разделяющих слоях, должны иметь «точечные» фильтры (0.5-1 м), так как направление фильтрации здесь вертикальное. Существуют проблемы технического характера – пьезометрические скважины с обычными фильтрами плохо работают в глинистых слоях; как правило, быстро происходит сильное заиливание и даже полное перекрытие фильтрового интервала.



Полезно попытаться применить датчики порового давления с достаточной чувствительностью;

– ещё одно, иногда немаловажное обстоятельство: *сброс откачиваемой воды!* Если поблизости нет крупного водоёма или реки (которые не меняли бы своего уровня под влиянием сброса) и откачиваемая вода сбрасывается на рельеф (пусть и на некотором расстоянии от центральной скважины), то возможен ощутимый подъём уровня грунтового водоносного горизонта, который исказит его реакцию на перетекание – особенно при длительных и мощных ОЭО.

Обработку откачек следует выполнять *методами, учитывающими существование перетекания*. Нередко практикуемое применение методов обработки для изолированного пласта оправдывается выбором начальных участков, когда перетекание якобы ещё не проявилось. При таком подходе вполне вероятны субъективные погрешности, за счёт которых в полученные значения параметров в какой-то степени войдут процессы перетекания. Если затем эти параметры заложить в прогнозные расчёты, где перетекание учитывается особо, то получится «двойной счёт».

Особое внимание при проектировании откачек следует уделить оптимальной расстановке наблюдательных скважин, поскольку обработка и временного (эталонные кривые $\lg W(u, \bar{r}) \div \lg \frac{1}{u}$), и площадного (эталонная кривая $\lg K_0(\bar{r}) \div \lg \bar{r}$) прослеживания наиболее эффективна в случае широкого диапазона радиальных координат точек наблюдения.

ГИДРОГЕОТЕРМИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ могут быть применены для ориентировочной оценки скорости перетекания и коэффициента фильтрации разделяющих слоёв. Они основаны на оценке степени деформации естественных гидрогеотермограмм в разрезе разделяющих слоёв (графики в координатах относительной температуры $\bar{\theta}$ от относительной глубины \bar{z}) под влиянием конвективного переноса тепла с потоком перетекания. Условия успешного применения: *а)* достаточная мощность слоя (несколько десятков метров); *б)* глубина залегания более 30-40 м (за пределами слоя сезонных колебаний температур). Технически наблюдения осуществляются с помощью косы терморезисторов (с надёжной гидроизоляцией), равномерно распределённых в интервале разделяющего слоя.

В литературе имеются описания примеров применения **ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ**, основанных на принципиально аналогичной модели массопереноса. В



качестве отслеживаемого индикатора рекомендуется использовать концентрацию хлоридов в поровых растворах пород разделяющих слоёв.

Наконец, для крупных месторождений и при достаточном информационном обеспечении хорошие результаты может дать решение **ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ** на моделях (обычно по стационарным состояниям потока при естественном или нарушенном режиме). Как правило, цель решения таких задач состоит в уточнении проницаемости разделяющих слоёв; при этом уровни смежных горизонтов задаются, а индикатором согласования служит совпадение модельных и натуральных уровней в контрольных точках основного горизонта. Успех решения таких задач, в основном, определяется: а) достаточностью пьезометрической сети (по площади и по вертикали), б) надёжностью используемых оценок проводимости основного горизонта.

ФОРМИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ВОДЫ НА ПЛАСТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

Для крупных артезианских бассейнов платформ характерно сложное естественное распределение минерализации – как по площади в основном пласте, так и в вертикальном разрезе. Поэтому при разведке необходим широкий комплекс пространственных *гидрогеохимических опробований* (по всем элементам разреза), тщательные наблюдения *во времени* при откачках (особенно длительных).

Нормальная вертикальная гидрогеохимическая зональность, свойственная пластовым толщам артезианских бассейнов, представляет собой важный естественный фактор возможного изменения качества воды при длительной эксплуатации водозаборов. Ещё более сложные условия создаются в случае инверсных гидрогеохимических разрезов.

Рассмотрим ситуацию с расположением водозабора в днище крупной речной долины, то есть в зоне площадной восходящей разгрузки межпластовых горизонтов по схеме Мятлева-Гиринского. В естественных условиях качество пластовой воды основного горизонта (например, по показателю общей минерализации C_e) определяется смешением состава «собственного» потока со стороны междуречий и состава «потока перетекания» из нижележащего смежного межпластового горизонта. При эксплуатации в зоне депрессионной воронки усиливается перетекание из нижележащего горизонта, а в ближайшей к водозабору области возникает, как правило, нисходящее перетекание из вышележащего смежного горизонта (случай Б, рис.8.2, 8.5).

Важно подчеркнуть, что при оценке возможных изменений качества извлекаемой водозабором воды следует учитывать только величины *дополнительно* возникшего

питания основного пласта (то есть привлекаемые ресурсы), так как величина естественного питания уже отражена в фоновых значениях минерализации пластовой воды C_e . Исходя из этой позиции, солевой баланс эксплуатационного водоотбора следует представить в таком виде:

$$C_3 Q_3 = C_0 \Delta Q_0 + C_{00} \Delta Q_{00} + C_e (Q_3 - \Delta Q_0 - \Delta Q_{00}), \quad (8.1)$$

где ΔQ_0 – расход дополнительного питания из верхнего горизонта (перетекание, возникшее в зоне полной инверсии разгрузки вокруг водозабора), ΔQ_{00} – расход дополнительного питания из нижнего горизонта (суммарное увеличение интенсивности естественного перетекания по всей площади депрессии), C_e – естественное содержание анализируемого компонента качества в пластовой воде основного горизонта, C_0, C_{00} – то же для верхнего и нижнего смежных горизонтов соответственно, C_3 – результирующее содержание компонента в воде, извлекаемой водозабором.

Отсюда общая формула смешения:

$$C_3 = C_e + \Delta \bar{Q}_0 (C_0 - C_e) + \Delta \bar{Q}_{00} (C_{00} - C_e). \quad (8.2)$$

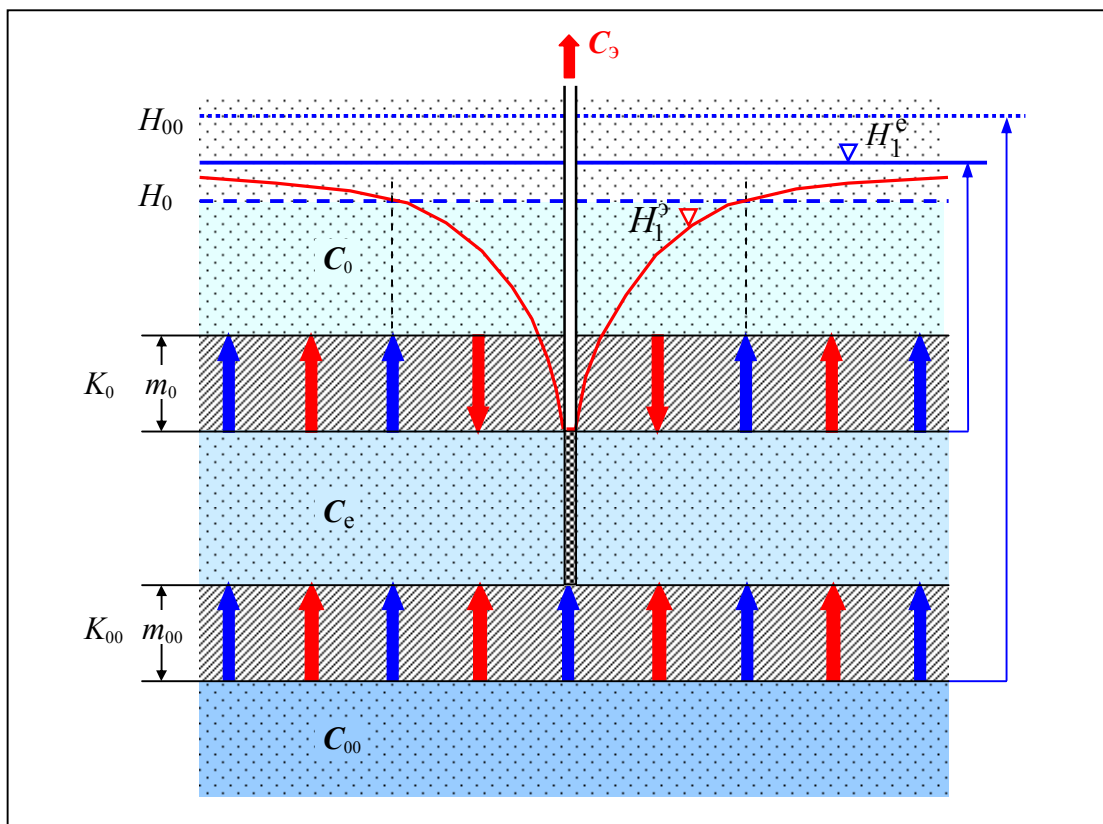


Рис.8.5. Принципиальная схема формирования качества воды в пластовой системе (направление перетекания в **ЕСТЕСТВЕННЫХ** условиях и при **ЭКСПЛУАТАЦИИ**)

В условиях нормального гидрогеохимического разреза C_0 обычно меньше C_e (если говорить об общей минерализации, а не о каких-то специфических показателях качества воды). Соответственно при эксплуатации принципиально возможно постепенное разбавление извлекаемой водозабором воды, то есть улучшение её качества. В то же время интенсификация перетекания снизу потенциально создаёт угрозу ухудшения качества, так как обычно $C_{00} > C_e$.

В условиях конкретных месторождений эта простейшая базовая схема может осложняться возможностью постепенного изменения C_0 и C_{00} при значительном распространении депрессии в смежных горизонтах.

Ещё одна интересная особенность:

– для нижнего разделяющего слоя сорбционная ёмкость N_{00} в естественных условиях уже насыщена по отношению к минерализации C_{00} , так как это естественное направление перетекания в течение длительного (даже в геологическом смысле) времени. Поэтому теоретически сразу после начала эксплуатации в основной горизонт начнёт поступать дополнительное количество воды ΔQ_{00} с концентрацией C_{00} .

– иная картина в верхнем разделяющем слое. Его сорбционная ёмкость N_0 насыщена по отношению к величине C_e – в соответствии с естественным направлением перетекания. Поэтому, когда в зоне полной инверсии возникнет дополнительное перетекание ΔQ_0 противоположного направления и с меньшей минерализацией C_0 , то в разделяющем слое должны пройти процессы десорбции – в течение некоторого времени в разделяющий слой из верхнего горизонта входит «пресная» вода, а выходит в основной горизонт уже насыщенная до уровня C_e (за счёт десорбционного «сноса»).

Длительность «промывки», то есть постепенного продвижения фронта десорбции от кровли разделяющего слоя к его подошве, можно ориентировочно оценить по схеме поршневого вытеснения:

$$t^* = \frac{m_0}{u_0^*} = \frac{m_0 n_0^*}{K_0 I_0} = \frac{m_0^2 n_0^*}{K_0 \Delta H_0}, \quad (8.3)$$

где u_0^* – действительная скорость движения воды в разделяющем слое, n_0^* – эффективная пористость пород разделяющего слоя, I_0 – вертикальный градиент напора при



перетекании через разделяющий слой, ΔH_0 – разность напоров между основным и смежным горизонтом.

Таким образом, эффект разбавления из верхнего горизонта будет отложен по времени, причём величина этой задержки может быть весьма значительной. При эффективной пористости порядка 0.1 (скорее всего, это даже заниженная величина для глинистых пород), градиенте напора порядка 1, мощности разделяющего слоя порядка первых десятков метров и коэффициенте фильтрации 10^{-3} - 10^{-4} м/сутки длительность промывки может составлять от 3-5 до 25-50 и более лет.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗСО

Расчёт размеров зоны санитарной охраны водозаборов для условий изолированного пласта (без перетекания, с транзитным естественным потоком или без него) рассмотрен нами выше в качестве примера при характеристике общих принципов таких расчётов.

Для взаимодействующих пластов:

а) Если эксплуатируется *грунтовый водоносный горизонт* при наличии перетекания из нижележащего первого межпластового горизонта, то предполагается, что общая конфигурация ЗСО сохраняется, однако размеры её уменьшаются. Поэтому рекомендуется производить расчёты следующим образом:

1. Расстояние до разделяющей точки А :

$$x_0 = \frac{Q_3}{2\pi q_e(1+\bar{T})} \left[\bar{T} + \frac{x_0}{B^*} K_1\left(\frac{x_0}{B^*}\right) \right],$$

где $\bar{T} = \frac{T_1}{T_2}$ – соотношение проводимости основного (1) и смежного (2) горизонтов, K_1 –

символ функции Бесселя второго рода первого порядка от мнимого аргумента, B^* – специальный фактор перетекания, рассчитываемый по зависимости $B^* = \sqrt{\frac{K_0}{m_0} \cdot \frac{(T_1 + T_2)}{T_1 T_2}}$.

При незначительной интенсивности перетекания $x_0 \rightarrow \frac{Q_3}{2\pi q_e}$ (см формулу 6.1), при явном преобладании перетекания $x_0 \rightarrow \frac{Q_3}{2\pi q_e} \cdot \frac{\bar{T}}{(1+\bar{T})}$.

2. Полуширина ЗСО $d = \pi x_0$.

3. Расстояния R_1 , R_2 рассчитываются по зависимостям (6.2, 6.3), но с использованием вычисленного в п.1 значения x_0 .

б) *Межпластовые водоносные горизонты*, как правило, являются достаточно защищёнными от проникновения загрязнений с поверхности земли в связи с наличием перекрывающих слабопроницаемых слоёв, обладающих большой сорбционной ёмкостью. Однако и для них рассчитывается зона санитарной охраны, в пределах которой ограничивается, главным образом, различного рода деятельность в недрах – в первую очередь, бурение скважин. Расчёты производятся как в случае (а) – с учётом перетекания из смежных горизонтов.

В условиях подчинённой роли естественного потока (по сравнению с расходами перетекания) некоторыми исследователями предлагается рассчитывать зону ограничений

в форме круга с радиусом $R = \sqrt{\frac{Q_3}{\pi W_0}}$, где W_0 – некая интегральная интенсивность

перетекания в пределах депрессионной воронки.

ИЗОЛИРОВАННЫЕ ПЛАСТЫ



Завершая характеристику месторождений в пластовых водоносных системах, нужно упомянуть о достаточно распространённом частном случае «изолированного пласта», когда процессами перетекания можно пренебрегать. Эта расчётная схема нередко применяется для МПВ во «внутренней» зоне артезианских структур.

Единственным источником формирования ЭЗ в этом случае являются *естественные запасы* эксплуатируемого пласта, поэтому при эксплуатации водозаборов постоянно сохраняется нестационарный режим. В связи с упругим характером водоотдачи ($\mu^* \sim 10^{-4}$) образуются депрессионные воронки значительных размеров. Например, даже при весьма небольшом водоотборе $Q = 1$ тыс. м³/сутки за расчётный срок эксплуатации $t_3 = 10^4$ суток извлекается 10^7 м³ воды. Соответственно необходимый объём депрессионной воронки

составит $\frac{Qt_3}{\mu^*} \approx 10^{11}$ м³. При среднем понижении порядка 10 м площадь воронки F

составит 10^{10} м², то есть её радиус $R = \sqrt{\frac{F}{\pi}}$ превышает 50 км! Скорее всего, это

нереальная цифра: в природе на таких расстояниях почти наверняка случится какая-то смена условий, подключатся другие источники формирования ЭЗ. Тем не менее, несмотря

на явную условность такого расчёта, можно сделать вывод о региональном характере депрессионных воронок при значительной изолированности водоносных пластов в разрезе.

Подсчёт запасов при относительной параметрической однородности продуктивного пласта можно выполнить по аналитическим зависимостям :

а) Для радиальной структуры притока к *компактным* водозаборам (одиночные скважины, кольцевые батареи, небольшие площадные группы скважин):

$$S_c = \frac{Q}{4\pi T} W(u), \quad u = \frac{r_{вз}^2}{4a^* t_э},$$

где $r_{вз}$ – радиус скважины или радиус «большого колодца», заменяющего расчётную водозаборную систему, a^* – пьезопроводность продуктивного пласта.

Очень быстро в водозаборе устанавливается квазистационарный режим:

$$S_c = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25a^* t_э}{r_{вз}^2}.$$

б) Для крупных *площадных* систем скважин решения строятся по принципу взаимодействия, то есть сложением понижений.

в) Есть аналитические решения для простых случаев неоднородности (пласт-полоса, пласт-круг с непроницаемыми границами и др.).

Следует уточнить понятие «изолированный пласт». В широком смысле этим термином можно обозначать любой пласт, не только не взаимодействующий со смежными пластами в вертикальном разрезе, но и не имеющий каких-либо внутренних и внешних питающих или дренирующих границ в ожидаемой области влияния водоотбора. Следовательно, под это определение могут попадать не только межпластовые водоносные горизонты, но и грунтовый водоносный горизонт – при условии пренебрежимо малого перетекания через его подошву и отсутствия балансообразующих границ в некоторой окружающей области в плане.

Полезен в практическом смысле анализ характерных размеров депрессионных воронок в неограниченных (в плане) изолированных (в разрезе) пластах. Теоретически обосновывается, что радиус области, в которой за счёт водоотдачи формируется 95% дебита водозабора, составляет $r \approx 3.5\sqrt{at}$, а реально ощутимые понижения прослеживаются на удалении до $r = 1.5\sqrt{at}$.

Для планирования размещения опытных работ важен размер зоны «эффективных» параметров, в пределах которой гидрогеодинамические параметры пласта будут



существенно влиять на понижение уровней в водозаборе и поэтому должны быть изучены достоверно. Одним из вариантов оценки размеров этой зоны можно предложить сравнение (рис. 8.6) аналитического расчёта понижений в неограниченном пласте (а)

$$S_0 = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25at}{r_c^2}$$

и в замкнутом (с непроницаемой границей) круговом пласте (б) радиусом R

$$S = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{0.47R}{r_c} + \frac{Qt}{\mu\pi R^2}$$

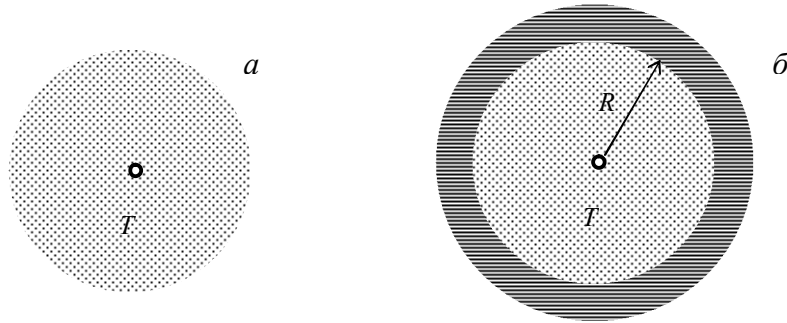


Рис. 8.6.

В удельных понижениях соответственно:

$$\bar{S}_0 = \ln \frac{2.25at}{r_c^2}; \quad \bar{S} = 2 \ln \frac{0.47R}{r_c} + \frac{4at}{R^2}$$

На графике зависимости относительной погрешности расчёта $\varepsilon = \frac{\bar{S} - \bar{S}_0}{\bar{S}_0}$ от размера изученной области радиусом R (для стандартного времени прогнозных оценок $t = 10^4$ суток) отчётливо видно, что вне зависимости от уровня (пьезо)проводности пласта понижения в неограниченном и замкнутом пласте не отличаются с погрешностью менее 10% при гидрогеодинамическом радиусе $R > \sqrt{at}$ (рис. 8.7).

Насколько велик физический размер этой зоны? Даже в наиболее «вязких» грунтовых водоносных горизонтах ($a \approx 10^3-10^4$ м²/сутки) она составляет 3-10 км, а в напорных межпластовых ($a \Rightarrow 10^6$ м²/сутки) достигает 100 км! Скорее всего, в реальных водоносных системах на таких расстояниях можно ожидать проявления каких-либо граничных воздействий. Для грунтовых водоносных горизонтов это могут быть поверхностные водотоки, водоёмы, болота (см. численные эксперименты в разделе «Приречные месторождения подземных вод»), а для межпластовых горизонтов – перетекание из смежных горизонтов.

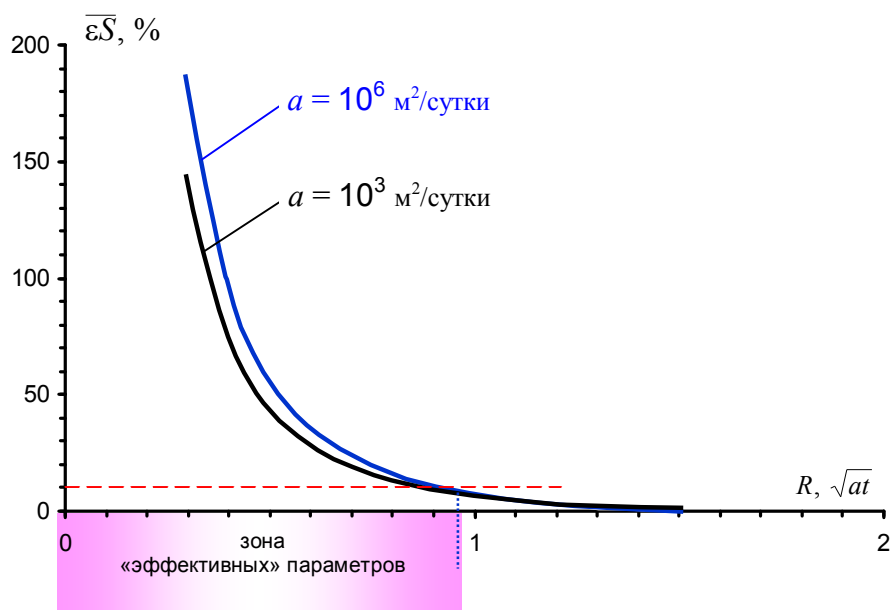


Рис. 8.7. Погрешность оценки понижений между неограниченным и замкнутым пластом

Взаимодействие водоносных горизонтов путём перетекания через слабопроницаемые разделяющие слои – основной процесс, сдерживающий развитие региональных депрессионных воронок в пластовых разрезах артезианских структур. Пренебрежение процессами перетекания в расчётах водозаборов приводит к значительному завышению прогнозных понижений.

Показательным (рис. 8.8) является сравнение понижений в изолированном пласте

$$S = \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{r_c^2}{4at}\right)$$

и в пласте с перетеканием

$$S = \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{r_c^2}{4at}, \frac{r_c}{B}\right).$$

Для грунтовых водоносных горизонтов перетекание существенно проявляется при значениях фактора $B < 2000$ м. При проводимости $500 \text{ м}^2/\text{сутки}$ таким сопротивлением обладает

10-метровый слой лёгких глин ($K_0 \approx 10^{-3} \text{ м/сутки}$)

Для напорных горизонтов перетекание имеет заметное значение даже при значениях фактора $B > 10000$ м. Таким сопротивлением обладают

50-метровый слой глин с коэффициентом фильтрации $(1-2) \cdot 10^{-4}$ м/сутки

или 10-метровый слой глин с коэффициентом фильтрации $5 \cdot 10^{-5}$ м/сутки

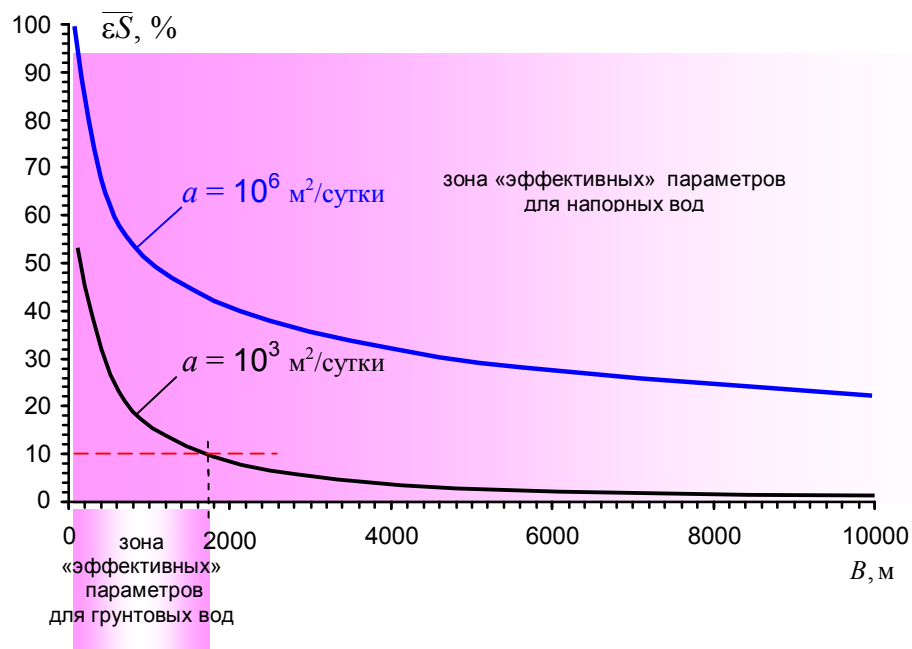


Рис. 8.8. Погрешность оценки понижений между неограниченным пластом и пластом с перетеканием

Особо следует подчеркнуть, что игнорирование процессов перетекания исключает возможность оценки понижений в смежных горизонтах и делает неопределённым прогноз изменения качества при эксплуатации, тем самым резко понижая достоверность оценки эксплуатационных запасов месторождения.